



Projet IPHI - Détermination des caractéristiques du faisceau en sortie du RFQ à l'aide des profils de faisceau mesurés

J.L. Coacolo

► To cite this version:

J.L. Coacolo. Projet IPHI - Détermination des caractéristiques du faisceau en sortie du RFQ à l'aide des profils de faisceau mesurés. 2007. in2p3-00180985

HAL Id: in2p3-00180985

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00180985>

Preprint submitted on 22 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IPNO-07-08

Projet IPHI

**Détermination des caractéristiques du faisceau en sortie du RFQ
à l'aide des profils de faisceau mesurés**

J. L. Coacolo

Table des matières

1 Introduction	4
2 Procédure utilisée	5
3 Description des deux méthodes de minimisation	6
3.1 Méthode de Powell	6
3.2 Méthode du Simplex	6
4 Validation de la procédure en utilisant un code matriciel pour le transport	7
4.1 Méthode de Powell	8
4.1.1 Influence des conditions initiales	8
4.1.2 Prise en compte des erreurs faites sur les mesures	10
4.2 Méthode du simplex	12
4.2.1 Influence des conditions initiales	12
4.2.2 Prise en compte des erreurs faites sur les mesures	14
4.3 Prise en compte des non linéarités dans la simulation du transport	14
5 Utilisation d'un code particulière	16
6 Conclusion	17

Cette étude a pour but de caractériser transversalement le faisceau de protons en sortie du RFQ du projet IPHI. On suppose connues les caractéristiques longitudinales du faisceau. En modifiant le gradient dans un des quadripôles de la ligne d'analyse du projet IPHI, différents profils transverses du faisceau sont mesurés à l'aide d'un wire scanner, voir figure 1. Les effets de la charge d'espace sur la dynamique du faisceau étant importants, il n'est plus possible d'utiliser la méthode de variation des gradients (appelée communément « méthode des 3 gradients ») pour déterminer les caractéristiques du faisceau, c'est à dire les paramètres de Twiss et les émitances. C'est pourquoi un programme de minimisation est développé à partir de travaux entrepris pour d'autres besoins [1]. Les caractéristiques initiales du faisceau sont déterminées en minimisant la distance comprise entre la courbe définie par les points de mesures (G_i, σ_i^j) et celle qui est simulées, où G_i est le gradient modifié dans le quadripôle et σ_i^j la i ème grandeur rms suivant x ou y, dans le plan transverse. Deux méthodes de minimisation sont testées, la méthode de Powell et la méthode du Simplex. Dans un premier temps, pour réduire la durée de calcul, un code matriciel est utilisé pour la simulation du transport du faisceau. Dans un deuxième temps on utilise un code particulière prenant en compte les effets non linéaires de la force de charge d'espace. Le résultat obtenu par la première méthode pourra être utilisé comme point de départ de la deuxième méthode.



2 Procédure utilisée

A l'aide de N profils obtenus en modifiant le gradient dans un des quadripôles, on détermine N couples de dimensions transverses (σ_x, σ_y) . Avec ces dimensions, on détermine les grandeurs caractéristiques du faisceau en sortie du RFQ, en utilisant un programme d'optimisation. L'algorithme utilisé est résumé en figure 2.

Les caractéristiques initiales définies par un point P_0 dans un espace à 6 dimensions sont générées aléatoirement, proches des caractéristiques du faisceau obtenues avec le code Toutatis en sortie du RFQ. Avec ces conditions initiales, on simule le transport entre le RFQ et le wire scanner pour les N valeurs de gradient dans un des quadripôles. On obtient ainsi N couples (σ_x, σ_y) et l'on va chercher à minimiser la fonction définie par:

$$f(\alpha_x, \beta_x, \varepsilon_x, \alpha_y, \beta_y, \varepsilon_y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{(\exp \sigma_{x,i} - \text{sim} \sigma_{x,i})^2}{\exp \sigma_{x,i}^2} + \frac{(\exp \sigma_{y,i} - \text{sim} \sigma_{y,i})^2}{\exp \sigma_{y,i}^2} \right),$$

avec $\alpha_x, \beta_x, \varepsilon_x, \alpha_y, \beta_y, \varepsilon_y$ les paramètres de Twiss et les émittances transverses.

$\exp \sigma_{x,i}$ est la valeur de sigma suivant l'axe des x, obtenue expérimentalement pour la $i^{\text{ème}}$ mesure et $\text{sim} \sigma_{x,i}$ la valeur du sigma équivalent obtenue par la simulation.

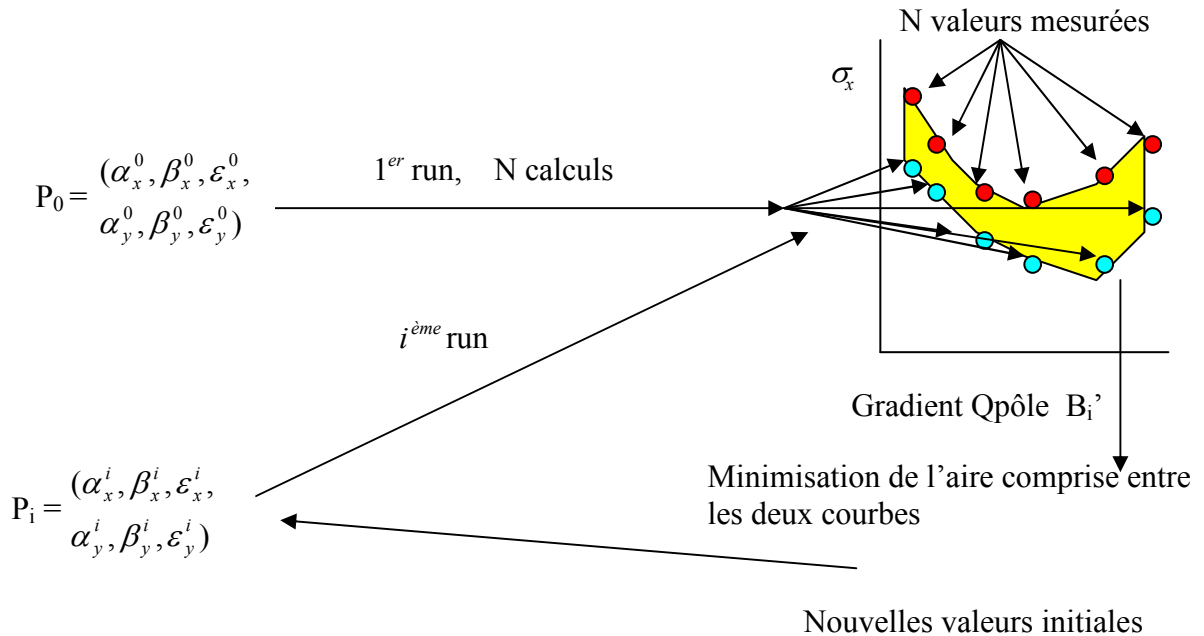


Figure 2 : Procédure utilisée

Minimiser la fonction f revient à minimiser la distance entre la courbe définie par les points expérimentaux et celle définie par les points calculés de la figure 2.

3 Description des deux méthodes de minimisation

3.1 Méthode de Powell

Soient une fonction f à plusieurs variables, un point P , une direction définie à partir du vecteur \vec{u} , λ un scalaire et la fonction g définie par :

$g(\lambda) = f(P + \lambda u)$, une coupe de la fonction f suivant la direction u passant par le point P .

La méthode de Powell consiste à minimiser f de la manière suivante :

- on part d'un point P_0 et d'une direction u_0 ,
- par minimisation dans l'espace à une dimension suivant la direction u_0 , on obtient un point P_1 ,
- on change de direction pour regarder ce qui se passe suivant u_1 ,
- par itération, on crée $P_2, u_2 \dots$ jusqu'à convergence de l'itération.

Lorsque les vecteurs u_i sont les vecteurs unitaires du repère, on parlera d'implémentation de base de la méthode de Powell. Selon la méthode utilisée pour le changement de direction on parlera de méthode de la plus grande pente ou du gradient conjugué. C'est cette dernière qui est prise dans la méthode de Powell et qui est utilisée pour la minimisation.

3.2 Méthode du Simplex

La méthode du simplex n'est pas la méthode la plus puissante lorsque l'on veut calculer un minimum d'une fonction à plusieurs variables, mais la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Un simplex dans un espace de dimension N est une figure géométrique composée de $N+1$ points reliés entre eux par des segments. Par exemple en dimension 2 le simplex est un triangle. Soit f la fonction à minimiser, on calcule les $N+1$ valeurs $f(P_i)$ et on les ordonne. L'idée est d'encadrer un volume d'espace et de le réduire autour d'un minimum trouvé (ne se trouvant pas forcément dans le volume initial). Pour cela on essaye de projeter le plus mauvais point du simplex de l'autre côté de l'hyperplan que constituent les N autres points et éventuellement appliquer une expansion de ce côté. Ces réflexions sont faites de manière à essayer de conserver le volume du simplex. On peut aussi avoir contraction du volume le long de l'axe du plus mauvais point, ou bien même des contractions selon toutes les dimensions vers le point dont la valeur de la fonction est la plus petite. A chaque itération on recalcule un nouveau simplex en générant un nouveau point pour remplacer le point le plus mauvais. On s'arrête lorsque la dimension du simplex est suffisamment petite.

4 Validation de la procédure en utilisant un code matriciel pour le transport

Pour juger de la validité de la méthode utilisée et accélérer le calcul, un code matriciel a été développé. Les deux méthodes sont testées avec ce programme. Dans un premier temps, avec les caractéristiques initiales du faisceau données par le code Toutatis [2], on simule le transport en faisant varier le gradient dans un des quadripôles et on détermine N couple (σ_x, σ_y) à l'endroit du wire scanner. Dans un second temps, avec les couples précédents (σ_x, σ_y) et la routine de minimisation on recherche les caractéristiques initiales. Celles-ci sont définies par le point P_c dans l'espace à 6 dimensions. Pour quantifier la sensibilité des deux routines aux conditions initiales P_0 (point de départ pour la routine de minimisation) et déterminer le point P_c , on recommence la minimisation pour N_1 points P_0 générés aléatoirement dans un sphéroïde de centre P_c .

Pour toutes ces études, les enveloppes du faisceau sont celles représentées sur la figure 3, à la modification prête en fin de ligne, due à la variation du gradient dans le dernier quadripôle.

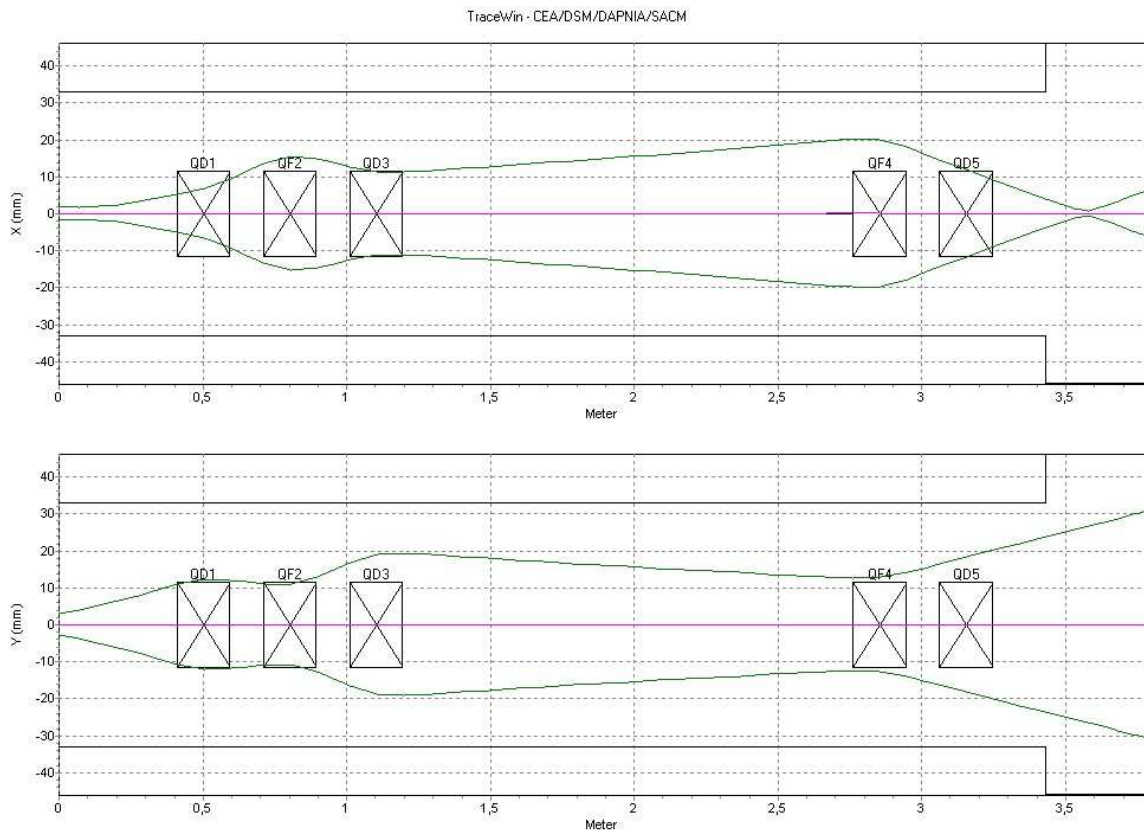


Figure 3 : Enveloppes du faisceau dans la ligne d'analyses

4.1 Méthode de Powell

4.1.1 Influence des conditions initiales

Les conditions initiales à déterminer sont celles définies dans le tableau 1 :

α_x	β_x (m/rad)	ε_x rms (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y rms (m.rad)
0.9908	0.238239	$3.44773 e^{-6}$	-2.03847	0.506892	$3.516225 e^{-6}$

Tableau 1

Les valeurs du gradient dans le dernier quadripôle et les dimensions rms transverses correspondantes du faisceau sont rappelées dans le tableau 2.

B' T/m	-4.9	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.1
σ_x (mm)	11.02	8.22	6.71	5.24	3.80	2.40	1.06	0.55	2.77
σ_y (mm)	2.74	0.30	1.77	3.42	5.12	6.86	8.63	10.44	13.80

Tableau 2

La procédure utilisée est la suivante :

On génère aléatoirement les conditions initiales dans un ellipsoïde centré en P_c tel que :

$\sqrt{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_{i,0} - x_{i,c}}{x_{i,c}} \right)^2} \leq 1$, avec $x_{i,0}$ la ième coordonnée du point initial et $x_{i,c}$ la ième coordonnée du point recherché. Après minimisation, on obtient un point P_f de coordonnées $x_{i,f}$. Comme il est difficile de représenter les points P_0 , P_c et P_f dans un espace à 6 dimensions, c'est la norme $N_f = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_{i,f} - x_{i,c}}{x_{i,c}} \right)^2}$ qui est représentée en fonction de la norme

$N_i = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_{i,0} - x_{i,c}}{x_{i,c}} \right)^2}$. La routine de minimisation converge vers la solution à déterminer

lorsque l'on a $N_f = 0$. La figure 4 représente $N_f = F(N_i)$. On peut voir que pour la quasi totalité des points, l'objectif est atteint c'est à dire que la routine de minimisation permet de retrouver les conditions initiales. La figure 5 représente $\alpha_{x,f}$ en fonction de $\alpha_{x,i}$, et montre que l'on converge vers la bonne valeur pour 104 points sur 110. Pour déterminer chaque paramètre initial, on fait une moyenne sur les N_1 valeurs trouvées et l'on affine le calcul en déterminant les écarts types et en éliminant les valeurs qui sont en dehors de 3 écarts types.

On peut vérifier sur la figure 6 que la méthode de Powell permet de retrouver avec une grande précision, les valeurs des dimensions rms du tableau 2 Sur cette figure sont représentées les dimensions rms obtenues pour les 110 point P_0 générés aléatoirement.

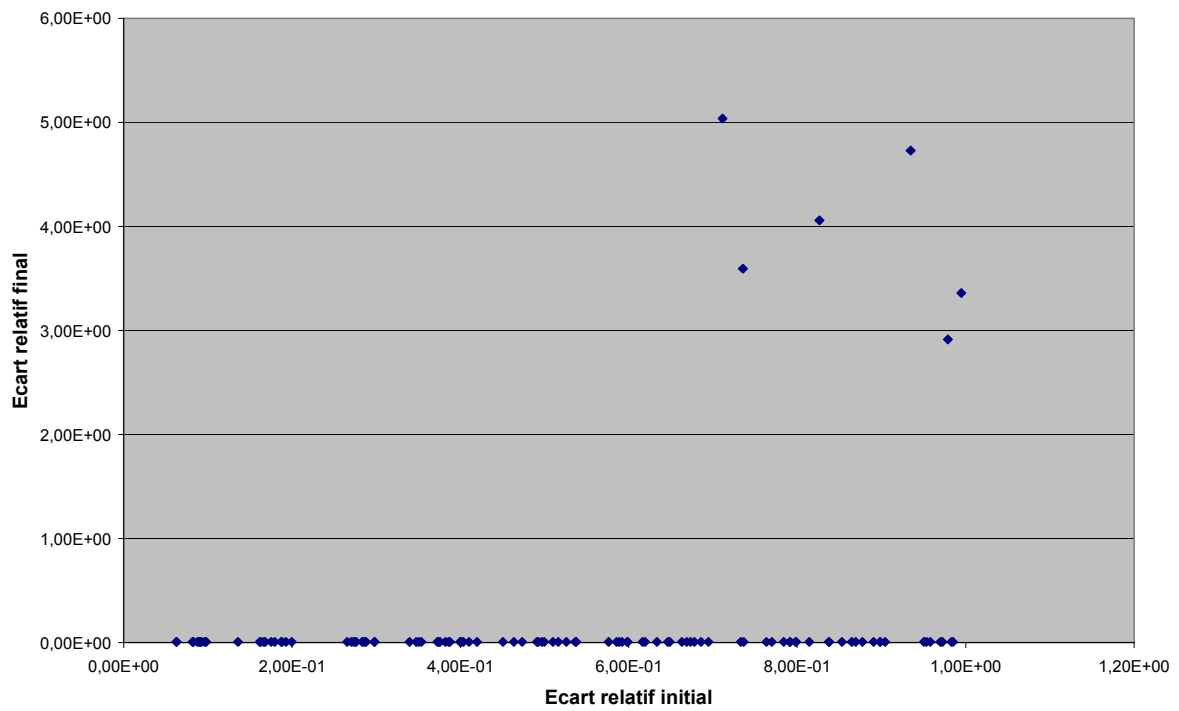


Figure 4 : Influence des conditions initiales sur la minimisation

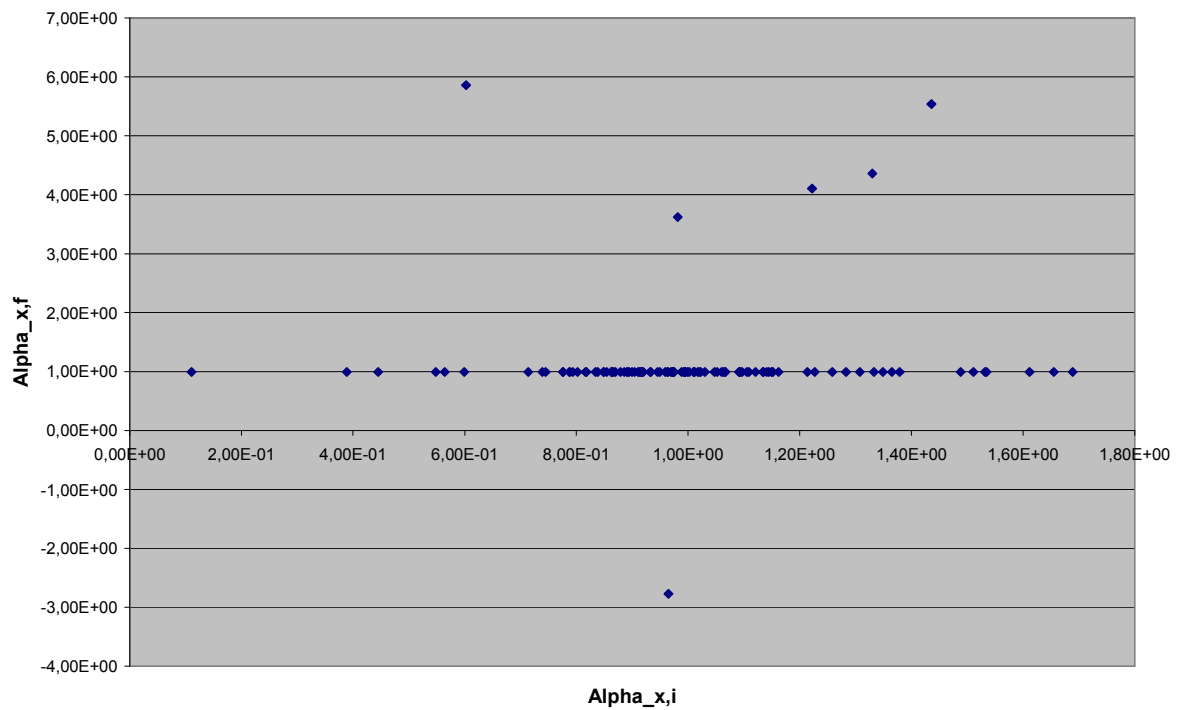


Figure 5: Valeurs de α_x obtenues après minimisation en fonction des valeurs de α_x initiales générées aléatoirement.

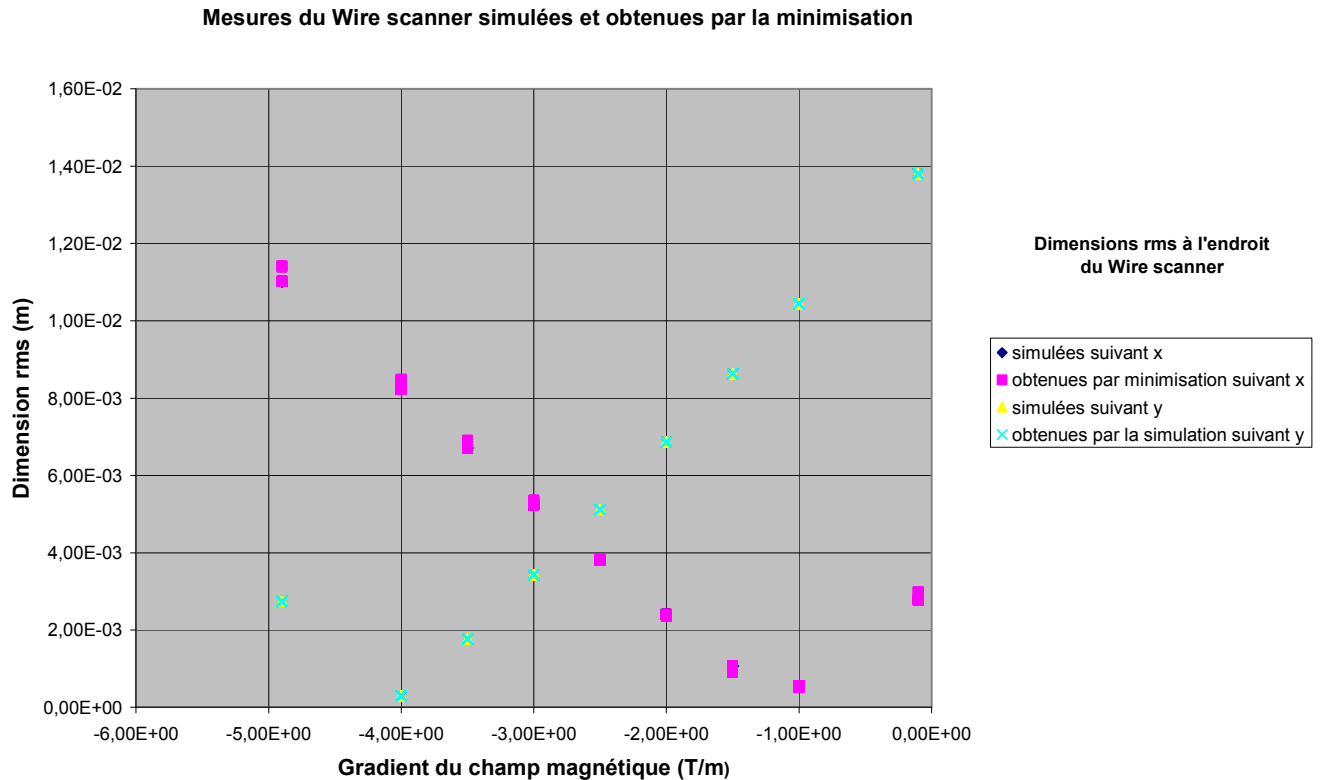


Figure 6 : Dimensions rms du faisceau simulées et obtenues par minimisation à l'endroit du wire scanner

La figure 6 montre l'excellent accord entre les valeurs des dimensions rms simulées et obtenues par la minimisation en x et y. Les valeurs obtenues par la minimisation ont été reportées pour les 110 cas générés aléatoirement.

Dans le tableau 3, sont reportées les conditions initiales recherchées, celles déterminées statistiquement après minimisation et les différents écarts types correspondants.

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ϵ_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ϵ_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.477 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
valeurs calculées	0.991	0.238	3.477 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
écart type	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Points utilisés	104	104	104	104	104	104

Tableau 3

110 points P_0 sont générées aléatoirement, pour chaque paramètre il y a 6 points sur les 110 hors des 3 écarts types. On peut remarquer les très bons résultats obtenus.

4.1.2 Prise en compte des erreurs faites sur les mesures

Dans le cas précédent nous supposons que les mesures étaient connues exactement. Pour tenir compte des erreurs faites sur celles-ci, on génère aléatoirement une erreur comprise entre plus ou moins 5% des valeurs précédentes, ceci pour chaque jeu de conditions initiales.

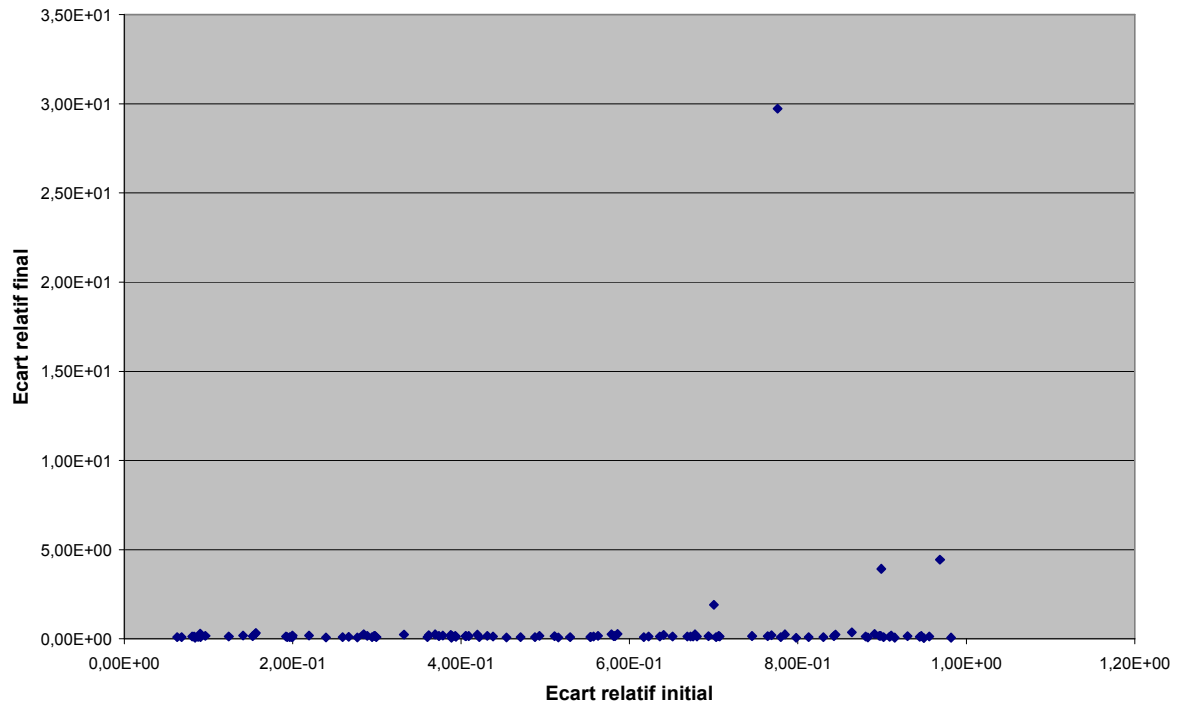


Figure 7 : Influence des conditions initiales sur la minimisation

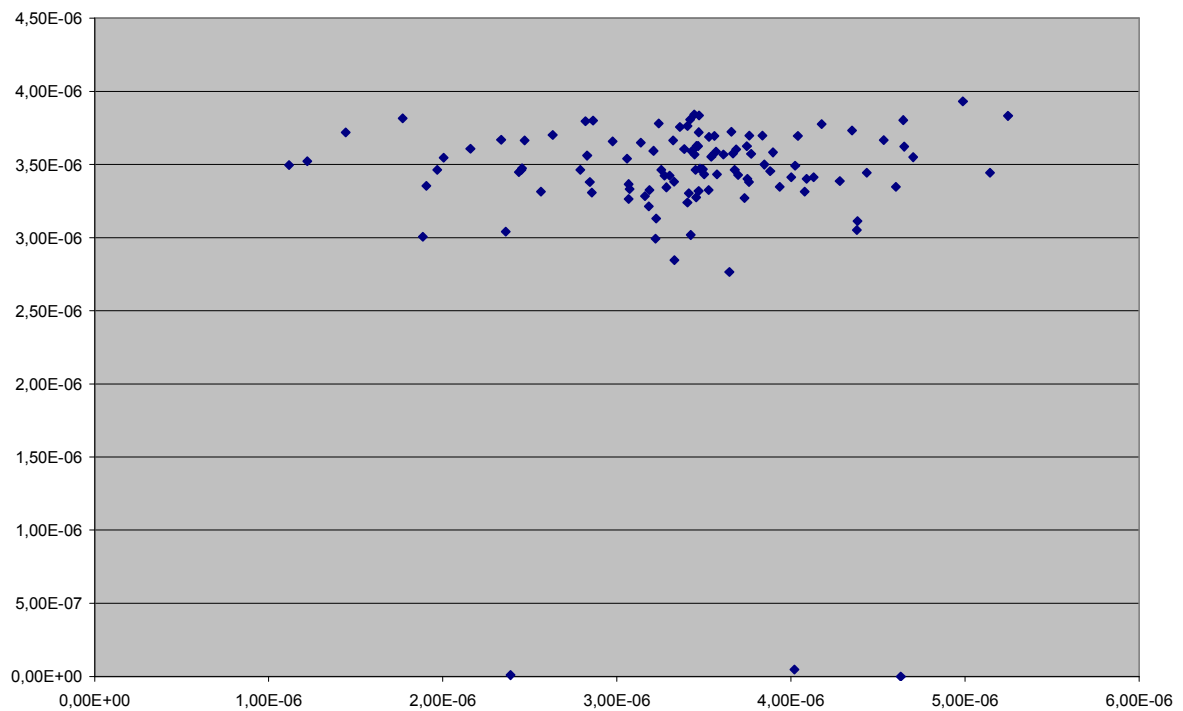


Figure 8 : ε_y obtenues après minimisation en fonction des valeurs de ε_y initiales générées aléatoirement.

Comme le montrent les figures 7 et 8, même si la dispersion des points pour la figure 8 est plus importante que pour le cas précédent, les résultats obtenus sont encore satisfaisants, le tableau 4 le confirme. En filtrant au plus 5 points, l'écart entre les différentes valeurs obtenues et les valeurs recherchées est de l'ordre du pourcent. Les écarts types sont inférieurs à 10 %.

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ε_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.477 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
valeurs calculées	0.983	0.240	3.503 e^{-6}	-2.066	0.518	3.446 e^{-6}
écart type	0.08	0.01	2.03 e^{-7}	0.09	0.03	2.77 e^{-7}
Points utilisés	107	107	105	106	106	107

Tableau 4

4.2 Méthode du simplex

4.2.1 Influence des conditions initiales

De même que pour la méthode de Powell, $N_f = F(N_i)$ est représentée sur la figure 9. Sur la figure 10 est représentée $\beta_{x,f}$ en fonction de $\beta_{x,i}$. Les deux figures montrent que cette méthode donne aussi de bons résultats. Ceci est conforté par le tableau 5.

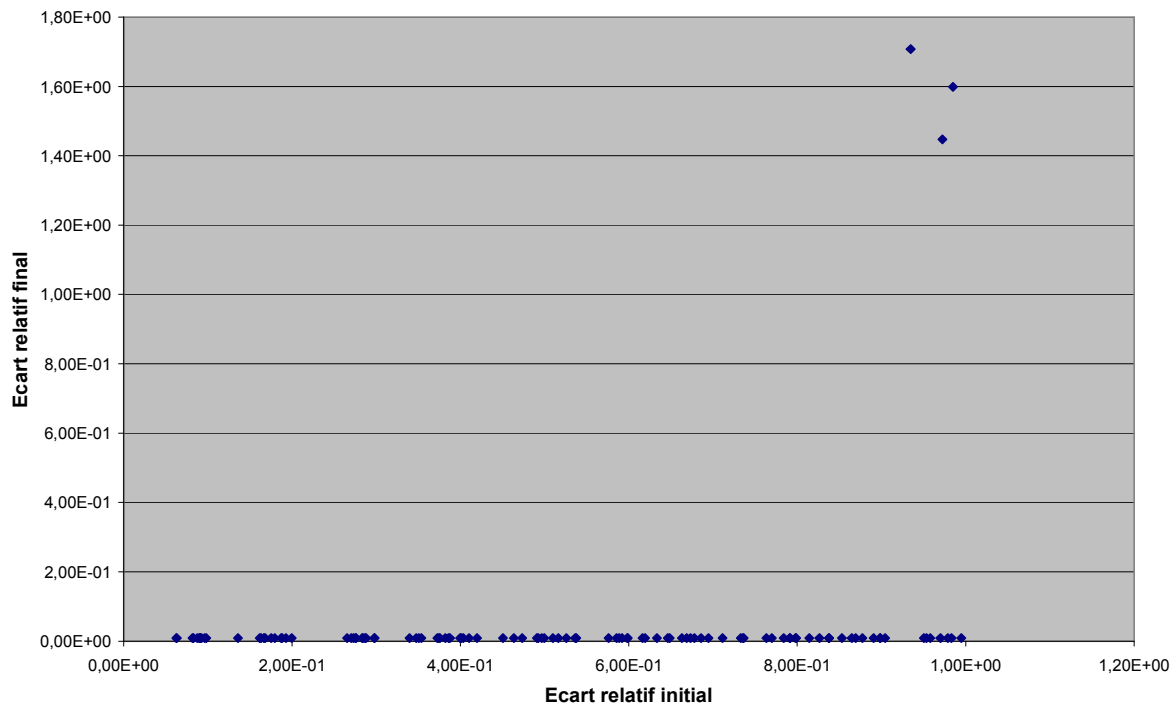


Figure 9 : Influence des conditions initiales sur la minimisation

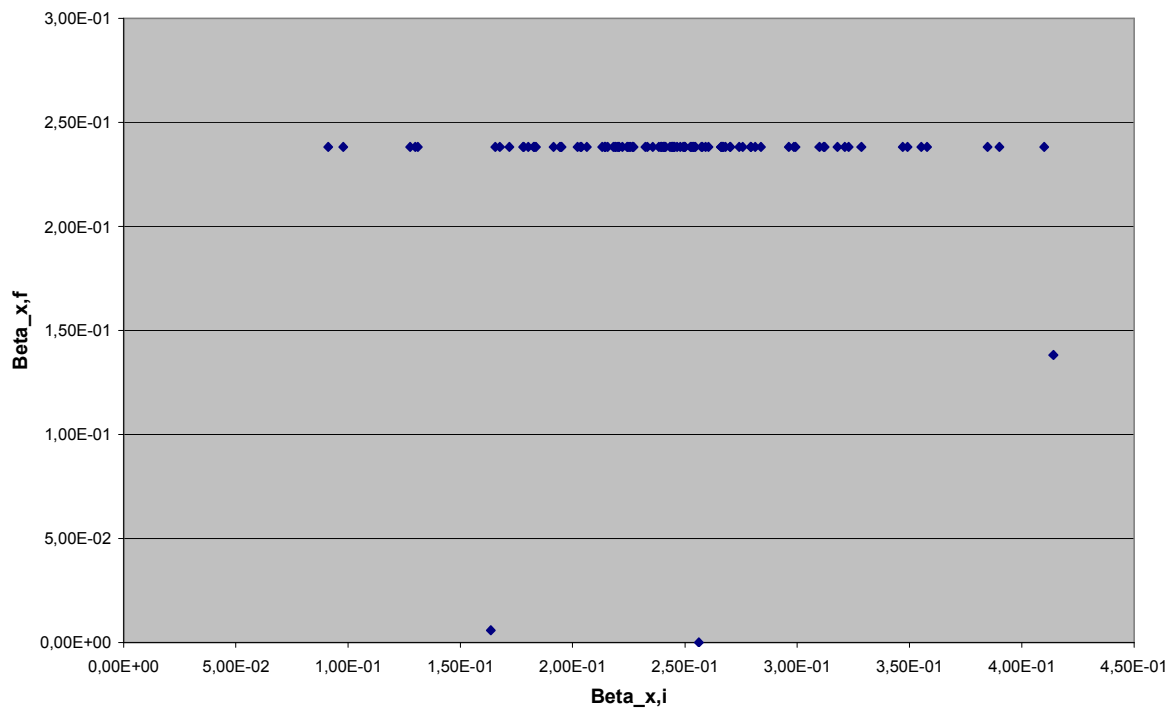


Figure 10 : β_x obtenues après minimisation en fonction des valeurs de β_x initiales générées aléatoirement.

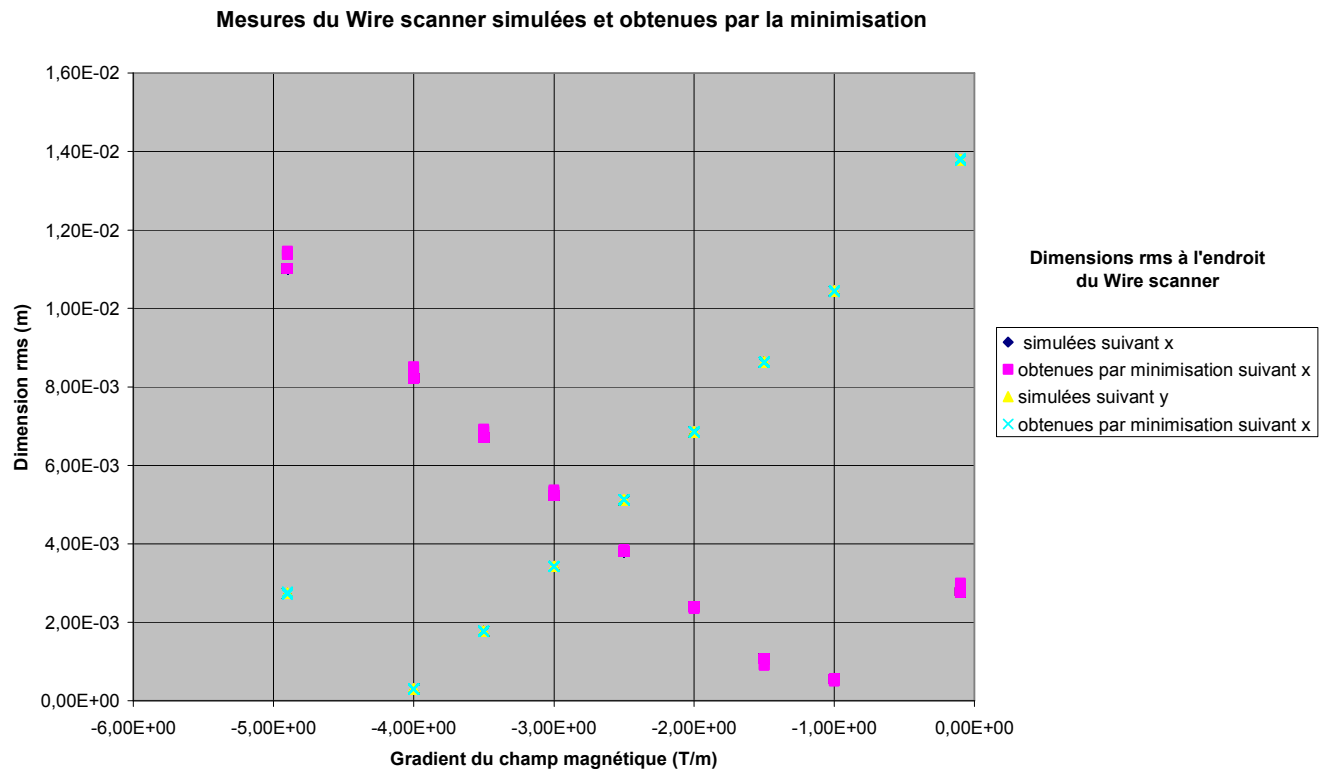


Figure 11 : Dimensions rms du faisceau simulées et obtenues par minimisation à l'endroit du wire scanner

Les remarques faites pour la figure 6 sont de nouveau valable pour la figure 11. On remarquera une fois de plus l'excellent accord entre les valeurs simulées et celles obtenues par la minimisation.

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ε_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.477 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
valeurs calculées	0.991	0.238	3.477 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
écart type	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Points utilisés	107	107	107	107	107	107

Tableau 5

4.2.2 Prise en compte des erreurs faites sur les mesures

Les résultats étant proches de ceux donnés par la méthode de Powell je ne reporterai ici que le tableau 6 donnant les valeurs moyennes des caractéristiques du faisceau déterminées et les écarts types associés.

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ε_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.477 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
valeurs calculées	0.982	0.240	3.503 e^{-6}	-2.066	0.518	3.438 e^{-6}
écart type	0.08	0.01	2.03 e^{-7}	0.09	0.03	2.79 e^{-7}
Points utilisés	108	109	107	107	107	108

Tableau 6

Les résultats sont satisfaisants et les erreurs sont de l'ordre du pourcent et des écarts types inférieurs à 10 %.

4.3 Prise en compte des non linéarités dans la simulation du transport

Dans les cas précédents, les mesures simulées sont obtenues à partir du transport de faisceau calculé par un code matriciel. Pour tenir compte des non linéarités de la force de charge d'espace nous allons maintenant utiliser le code particulaire, Tracewin [3] et simuler le transport jusqu'au wire scanner. L'optimisation est faite avec le code matriciel.

Dans un premier temps la routine PICNIR est utilisée pour déterminer la force de charge d'espace. Le calcul du champ généré par la charge d'espace se fait en considérant que la charge est distribuée dans un anneau circulaire. La section transverse elliptique du faisceau est prise en compte lorsque l'on calcul le rayon effectif de l'anneau chargé.

Les valeurs du gradient dans le dernier quadripôle et les dimensions rms transverses du faisceau correspondantes sont présentées dans le tableau 7. On remarque des écarts maxima de +20 % sur les valeurs en y entre les tableaux 7 et 2. Les dimensions suivant x sont assez proches, l'écart est inférieur à 5 % (excepté pour le minimum).

B' T/m	-4.9	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.1
σ_x (mm)	10.70	8.00	6.50	5.06	3.66	2.30	1.03	0.67	2.77
σ_y (mm)	3.16	0.51	2.21	4.16	6.16	8.21	10.31	12.44	16.41

Tableau 7

Les résultats présentés dans le tableau 8 pour les deux méthodes montrent que ce qui est dit ci-dessus se traduit par une certaine dissymétrie dans la qualité des résultats obtenus horizontalement et verticalement. On remarquera l'excellent accord entre les deux routines d'optimisation.

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ε_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.478 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
Powell						
valeurs calculées	0.939	0.261	4.332 e^{-6}	-0.937	0.235	6.696 e^{-6}
écart type	0.06	0.01	2.01 e^{-7}	0.05	0.008	5.06 e^{-7}
Points utilisés	110	110	110	110	110	110
Simplex						
valeurs calculées	0.937	0.262	4.338 e^{-6}	-0.939	0.235	5.209 e^{-6}
écart type	0.06	0.01	2.01 e^{-7}	0.05	0.09	2.02 e^{-7}
Points utilisés	105	98	107	92	94	110

Tableau 8

Ceci peut être dû à la routine de charge d'espace prenant assez mal en compte les dimensions transverses. Pour essayer d'accroître la précision du calcul dans le plan vertical, on utilise la routine PICNIC déterminant la force de charge d'espace en 3 dimensions.

Le tableau 9, obtenu avec la routine PICNIC, montre que les valeurs suivant l'axe y se rapprochent de celle du tableau 2. En ce qui concerne la variable y, le tableau 10 donne de meilleurs résultats que le tableau 7

B' T/m	-4.9	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.1
σ_x (mm)	11.06	8.26	6.75	5.27	3.83	2.43	1.12	0.66	2.81
σ_y (mm)	2.94	0.47	2.01	3.80	5.64	7.53	9.46	11.43	15.08

Tableau 9

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ε_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.478 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
Powell						
valeurs calculées	1.007	0.270	4.584 e^{-6}	-1.178	0.302	5.936 e^{-6}
écart type	0.06	0.01	2.02 e^{-7}	0.06	0.01	3.66 e^{-7}
Points utilisés	110	110	110	110	110	110
Simplex						
valeurs calculées	1.003	0.270	4.600 e^{-6}	-1.179	0.303	5.933
écart type	0.06	0.009	1.85 e^{-7}	0.06	0.01	3.68 e^{-7}
Points utilisés	109	108	108	106	106	106

Tableau 10

5 Utilisation d'un code particulière

Pour prendre en compte la composante non linéaire de la force de charge d'espace, l'optimisation est faite avec un code particulière, PARTRAN. Les méthodes du simplex et de Powell sont utilisées. La simulation du transport est faite avec la routine PICNIC et l'optimisation utilise la routine PICNIR.

cond. initiales	α_x	β_x (m/rad)	ε_x (m.rad)	α_y	β_y (m/rad)	ε_y (m.rad)
valeurs exactes	0.991	0.238	3.478 e^{-6}	-2.039	0.507	3.516 e^{-6}
Powell						
valeurs calculées	1.10	0.240	3.807 e^{-6}	-1.400	0.458	3.656 e^{-6}
écart type	0.18	0.02	6.6 e^{-7}	0.23	0.08	$.9 \text{ e}^{-7}$
Points utilisés	94	95	99	85	98	100
Simplex						
valeurs calculées	1.054	0.260	4.46 e^{-6}	-1.543	0.479	3.47 e^{-6}
écart type	0.13	0.019	$4. \text{ e}^{-7}$	0.23	0.09	1 e^{-6}
Points utilisés	97	97	95	85	98	100

Tableau 11

Le tableau 11 montre les résultats obtenus avec les deux routines de minimisations et en tenant compte d'une erreur sur les mesures de $\pm 5\%$.

Les résultats sont meilleurs que ceux obtenus avec le code matriciel, surtout suivant l'axe des y. Le tableau montre des résultats qui diffèrent des valeurs simulés de 30% au plus.

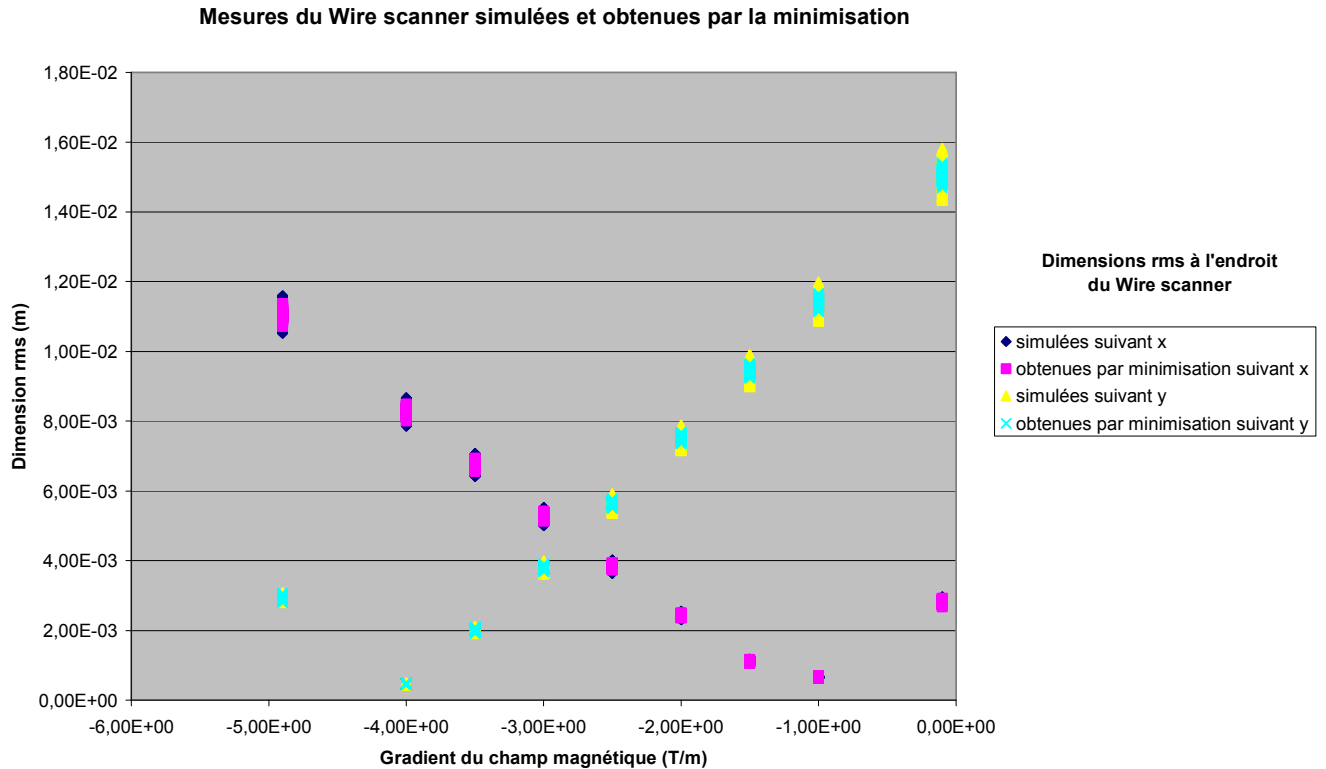


Figure 12 : Dimensions rms du faisceau simulées et obtenues par minimisation à l'endroit du wire scanner

Sur la figure 12, pour chaque mesure nous avons représenté les 110 points simulés, chaque point représente une mesure avec une erreur générée aléatoirement. Naturellement les 110 points obtenus par la minimisation sont aussi représentés. On remarquera que la dispersion est plus grande pour les points simulés. Il semblerait que la minimisation corrige une partie des erreurs dues aux mesures. D'autre part il y a un bon accord entre les valeurs simulées et obtenues par la minimisation.

6 Conclusion

Dans le but de caractériser le faisceau en sortie du RFQ du projet IPHI, un programme d'optimisation a été développé. La détermination de ces caractéristiques s'appuie sur les mesures faites avec le wire scanner. N'ayant pas à l'heure actuelle d'acquisitions de données, ce programme est testé avec des valeurs obtenues par la simulation. Deux méthodes de minimisation sont regardées. Les résultats obtenus avec les deux méthodes en utilisant un code matriciel pour la simulation et pour la minimisation sont excellents. Dans l'étape suivante, des erreurs de $\pm 5\%$ sur les dimensions transverses du faisceau sont prises en compte. Les écarts entre les valeurs recherchées et obtenues par la minimisation sont inférieurs à 3%. Pour tenir compte des effets non linéaires de la charge d'espace lors du transport du faisceau dans la ligne d'analyse, la simulation a été faite avec le code Tracewin, l'optimisation prend toujours en compte des erreurs faites sur les mesures. Les valeurs obtenues s'éloignent des valeurs recherchées et l'écart peut aller jusqu'à 50%. Pour remédier à ceci et accroître la qualité des résultats, la simulation et l'optimisation se font avec le code particulier. Ceci permet d'avoir des écarts inférieurs à 30% entre les caractéristiques recherchées et obtenues

par la minimisation. Il n'apparaît pas nécessaire de développer d'autres méthodes de minimisation pour essayer d'accroître la précision des résultats vu que ce qui est limitatif est l'ensemble des erreurs faites sur les mesures.

Références

- [1] Communication privée.
- [2] R. Duperrier, « TOUTATIS, a RFQ code », Physical Review Acc. & Beams, décembre 2000.
- [3] D. Uriot & N. Pichoff, « TraceWin Documentation », rapport interne DSM/DAPNIA/SEA 2000/45.